中国生态农业学报 2016 年 2 月 第 24 卷 第 2 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Feb. 2016, 24(2): 244−255
ChinaXiv合作期刊

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.150969

黄骅市土壤保持价值年内动态特征*

陈召亚[1] 李 超[2] 何 玲[3] 王树涛[3] 许 皞[1,3]** 马立军[3]

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院 保定 071000; 2. 中国农业大学资源与环境学院 北京 100193; 3. 河北农业大学国土资源学院 保定 071000)

摘 要 掌握不同生态系统类型土壤侵蚀和土壤保持量的年内动态变化, 对于区域水土保持重点及时序安排具有积极的指导作用。本研究在 GIS 支持下, 运用通用土壤流失方程(USLE)对河北省黄骅市不同生态系统年内土壤侵蚀与保持量进行计算, 并利用市场价值法、机会成本法对各生态系统类型年内各月的土壤保持价值进行测算, 研究黄骅市土壤保持价值年内动态特征。研究表明, 黄骅市全年各月土壤保持价值分配不均, 年内动态特征与土壤保持量的季节动态变化规律一致, 8 月达到最大峰值, 1—3 月、10 月、12 月价值均为零, 5—8 月呈增加趋势, 5—9 月土壤保持价值占全年土壤保持价值的 82.47%。从各生态系统类型来看, 草地 8 月的单位面积土壤保持价值最大, 为 128.87 元·hm^{-2}; 水域 9 月的单位价值最小, 为 11.23 元·hm^{-2}。从土壤保持价值构成来看, 年内各土壤保持功能单位面积贡献价值大小排序为: 减少土壤养肥流失价值>减少淤泥淤积价值>减少废弃土地价值。研究区各生态系统类型的土壤保持价值具有明显随季节变化的规律, 在雨季受暴雨等短期大量降水的影响, 土壤潜在的侵蚀量增大, 而生态系统的土壤保持功能和价值在此过程得以发挥作用。

关键词 土壤侵蚀 土壤保持功能 土壤保持价值 生态系统类型 年内动态变化
中图分类号: F301; F205; N31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)02-0244-12

Intra-annual dynamics of soil conservation features in Huanghua City*

CHEN Zhaoya[1], LI Chao[2], HE Ling[3], WANG Shutao[3], XU Hao[1,3]**, MA Lijun[3]

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3. College of Land Resources, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China)

Abstract China is one of the countries in the world with the most severe soil erosion. Mastering various changes in regional soil erosion, soil conservation and ecological dynamics is critical for prioritization of regional soil and water conservation in time and space to combat soil erosion for sustainable development. At present, research on long-term soil conservation has ignored the erosion force of rainfall and the dynamic changes in vegetation coverage. Using GIS and Universal Soil Loss Equation (USLE), we calculated soil erosion and soil conservation amounts in a typical coastal saline soil region, Huanghua City of Hebei Province. Furthermore, using market value and soil opportunity cost, we calculated monthly soil conservation value in the study area. The dynamic characteristics of soil conservation in coastal land ecosystems were important for ecological security and the maintenance of China's coastal areas. The results showed uneven monthly distribution of soil conservation values that was in agreement with the seasonal dynamics of soil conservation amount which peaked in August. The soil conservation value was zero for January, February, March, October, and December, while it increased from May to August. Soil conservation value from May to September accounted for 82.47% of the total of the year. Among different ecosystems, grassland showed the highest soil conservation value per unit area in

* 国土资源部公益性行业项目(201311060)、河北省高等学校科学技术研究优秀青年基金项目(Y2012015)、河北省《生态补偿问题研究》课题资助
** 通讯作者: 许皞, 主要研究方向为土地资源。E-mail: xuhao22003@126.com
陈召亚, 主要从事土壤与土地资源持续利用研究。E-mail: chenzhaoya1990@163.com
收稿日期: 2015−09−06 接受日期: 2015−12−03

* This study was supported by the Special Fund for Land-scientific Research in the Public Interest (No. 201311060), the Research Foundation for Excellent Youngers in University of Hebei Province (No. Y2012015) and the Ecological Compensation Research of Hebei Province.
** Corresponding author, E-mail: xuhao22003@126.com
Received Sep. 6, 2015; accepted Dec. 3, 2015

chinaXiv:201711.00309v1

ChinaXiv合作期刊

August (128.87 Yuan·hm^{-2}). The soil conservation value per unit area of water body was minimum in September (11.23 Yuan·hm^{-2}). For different functions of soil conservation, the order of value contributions to soil conservation value per unit area was value of reducing soil fertility loss > value of reducing silt deposition > value of reducing land abandonment. The soil conservation values of different ecosystems in the study area changed obviously with season. In the rainy season, the heavy short-durational rains increased soil loss, when the soil conservation functions of ecosystems were more important for combating soil loss.

Keywords　Soil erosion; Soil conservation function; Soil conservation value; Ecosystem type; Dynamic changes within one year

chinaXiv:201711.00309v1

生态系统服务的流量过程随时间呈动态变化，但目前对生态服务流量过程的研究仍较为薄弱[1−2]。迄今为止，生态系统服务价值评价多是以年为单位进行静态评价，忽略了生态系统服务年内的动态差异。现阶段对生态系统服务流量过程认知不足，导致无法形成系统方法来规划生态系统服务[3]。因此，研究生态系统服务年内动态特征，有利于加强对生态系统服务形成机理的认知，使生态系统服务更好地为人类服务。

土壤侵蚀是近年来全世界面临的一个严峻问题，中国是世界上水土流失最为严重的国家之一。然而，目前对土壤保持价值的研究多以年为时间尺度[4−8]，忽略了降雨侵蚀力和植被盖度的年内动态变化，因此，削弱了土壤保持价值评价的精度，同时也缺少对生态系统土壤保持价值年内动态变化特征的揭示。近年来，也有少数研究者开始关注土壤保持价值年内动态变化特征的研究，但主要集中于对森林生态系统[9]或草地生态系统[10]在不同地区年内变化特征的比较，较少涉及同一地区不同生态系统类型间土壤保持价值年内动态变化特征的揭示和比较。如李士美等[9]对 5 种森林生态系统的土壤保值价值年内动态进行了研究，分析了不同森林生态系统土壤保持价值的组成以及发挥土壤保值功能的集中时间。裴厦等[10]对内蒙古温带草原和海北高寒草甸的土壤侵蚀进行了特征分析，并得出了侵蚀主要的发生季节和具体时间。

滨海陆地生态系统处于陆地与海洋间的过渡地带，生态系统类型复杂、多样，在维护海洋生态系统与陆地生态系统的稳定性、维持海岸带社会经济的可持续发展等方面发挥着重要作用。我国海岸线长逾 3.2×10^4 km, 15 m 等深线以内的浅海、滩涂、滨海盐土有约 1.4×10^7 hm^2，研究滨海陆地生态系统土壤保持价值年内动态特征，对于保护我国沿海地区生态安全，维护社会具有重要意义。

本文以地处滨海地区的河北省黄骅市为研究对象，以研究区土地利用类型数据、逐月 NDVI 数据、化验所得土壤基础数据及 DEM 等数据为基础，选用通用土壤流失方程对逐月土壤侵蚀量进行估算，通过建立的滨海陆地生态系统土壤保持价值年内动态评估模型对逐月土壤保持价值年内动态特征进行评估与分析，研究县域尺度滨海盐碱土区典型生态系统土壤保持价值年内动态特征分析方法，并比较分析了黄骅市不同生态系统类型土壤保持价值年内动态变化特征。

1　研究区概况及数据预处理

1.1　研究区概况

黄骅市位于河北省东南部，为属沧州市管辖的县级市，东临渤海，南接海兴县，西界沧县与孟村回族自治县，北倚天津，地理坐标为北纬 38°09′~38°39′，东经 117°05′~117°49′，总面积 2 177.83 km^2，海岸线长 65.8 km(图 1)。气候属暖温带半湿润大陆性季风气候，靠近渤海而略具海洋气候特征，平均气温为 12.0~12.9 ℃，年蒸发量 1 909.6 mm，黄骅市主要植被类型有夏玉米(*Zea mays*)、苜蓿(*Medicago sativa*)、芦苇(*Phragmites australis*)、枣树(*Zizyphus jujuba*)等，其物候期如表 1 所示。全市共设 4 个镇、6 个乡、327 个行政村，以及中捷产业园区、南大港产业园区和黄骅港区。

1.2　数据获取及预处理

1.2.1　遥感数据处理

以研究区 2011 年 LandSat-7TM 数据(地理空间数据云网站下载获得，成像时间 2011 年 6 月 25 日，轨道号 122/33，平均云量为 1.5)为基本数据源，利用 ENVI 4.7 对影像图进行波段组合、几何校正(误差值不超过 0.5 个像元)、区域裁剪等数据预处理，然后在 Arcgis 9.3 支持下，采用监督分类与目视解译结合的解译方法，参照土地利用分类方法，获取研究区 2011 年土地利用数据库，并参考研究区 2011 年土地变更调查数据对研究区各土地利用类型面积及结构比例进行调整、检验，使解译结果的总精度及 Kappa 指数大于 0.8。

从地理空间数据云网站下载获得 MOD13Q1 的 MODIS 数据产品，时间跨度为 2011 年 1—12 月。此

ChinaXiv合作期刊
chinaXiv:201711.00309v1

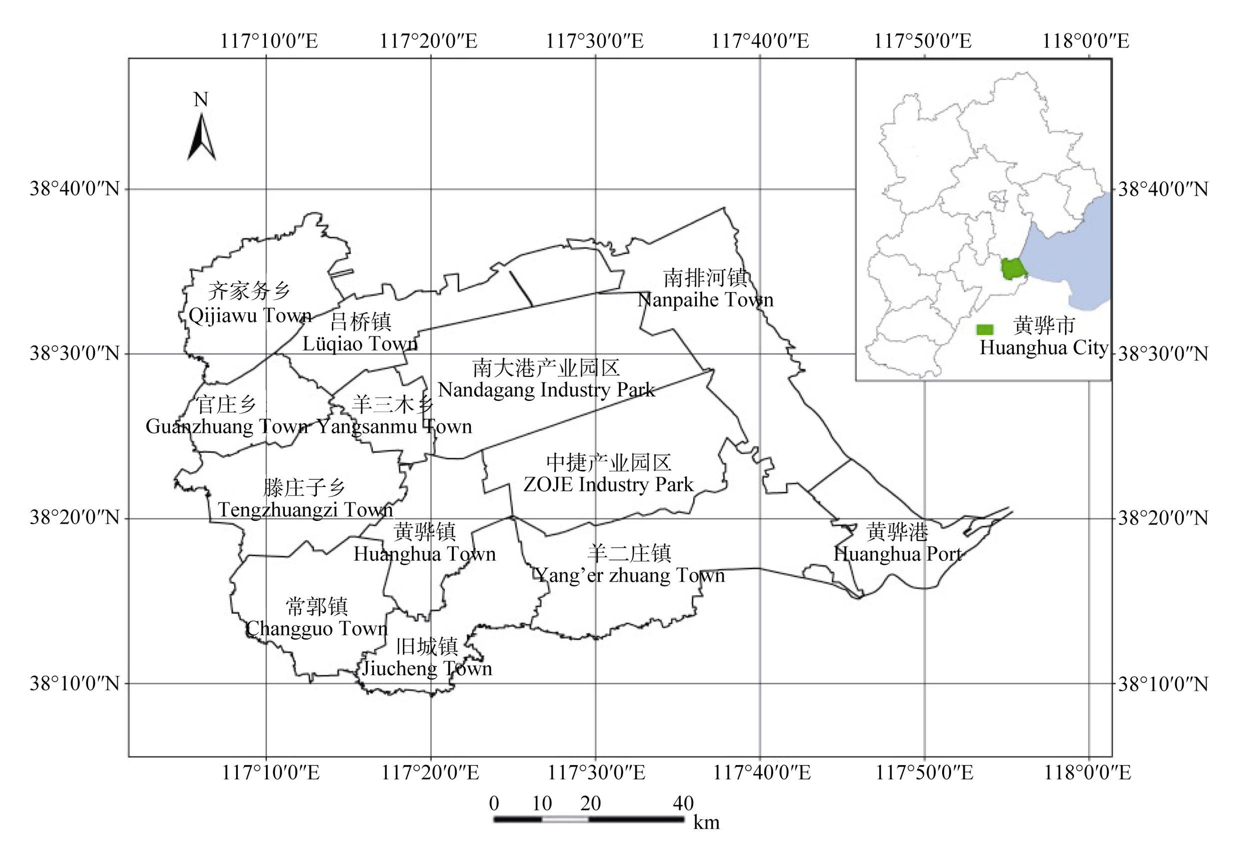


图 1 黄骅市地理位置图

Fig. 1 Geographical location of the study area of Huanghua City

表 1 黄骅地区主要植被物候期初始时段

Table 1 Initial period of main phenological periods of plants in the study area of Huanghua City

植物名称 Plant name	展叶期/返青/苗期 Leaf-expansion / turning green / seedling stage	叶盛期/分枝 Leaf unfolding prime / branching	开花期 Flowering stage	落叶期/黄枯期/割刈期 Deciduous period / wilting date / cutting	参考文献 Reference
白刺 *Nitratia gangutorum*	3 月下旬 Last ten-day of March	4 月中旬 Middle ten-day of April	5 月上旬 First ten-day of May	11 月下旬 Last ten-day of November	[11]
冬枣 *Ziziphus jujube* 'Dongzao'	4 月下旬 Last ten-day of April	5 月下旬 Last ten-day of May	6 月上旬 First ten-day of June	10 月上旬 First ten-day of October	[12]
国槐 *Sophora japonica*	4 月中旬 Middle ten-day of April	5 月上中旬 First and middle ten-day of May	7 月中旬 Middle ten-day of July	10 月中旬 Middle ten-day of October	[13]
柳树 *Salix* spp.	3 月中下旬 Middle and the last ten-day of March	4 月上旬 First ten-day of April		11 月下旬 Last ten-day of November	[14]
芦苇 *Phragmites australis*	4 月下旬 Last ten-day of April	5 月上中旬 First and middle ten-day of May	8 月中下旬 Middle and the last ten-day of August	10 月上中旬 First and middle ten-day of October	[15]
夏玉米 *Zea mays*	6 月上中旬 First and middle ten-day of June	7 月中旬 Middle ten-day of July		9 月下旬或 10 月上旬 Last ten-day of September or first ten-day of October	[15]
棉花 *Gossypium hirsutum*	4 月下旬或 5 月上旬 Last ten-day of April or the first ten-day of May	6 月上中旬 First and middle ten-day of June	7 月上旬 First ten-day of April	10 月下旬 Last ten-day of October	[16]
冬小麦 *Triticum aestivum*	10 月 October	3 月中下旬 Middle and the last ten-day of March		5 月中下旬 Middle and the last ten-day of May	[16]
苜蓿(一茬) *Medicago sativa* (the first crop)	3 月上旬 First ten-day of March	3 月下旬或 4 月上旬 Last ten-day of March or First ten-day of April	4 月下旬 Last ten-day of April	5 月中下旬 Middle and the last ten-day of May	[17]
苜蓿(二茬) *Medicago sativa* (the second crop)	5 月中下旬 Middle and the last ten-day of May	6 月上旬 First ten-day of June	6 月下旬 Last ten-day of June	10 月上中旬 First and middle ten-day of October	[17]
草本类 Herbaceous plant	4 月上旬 First ten-day of April	4 月中下旬 Middle and the last ten-day of April	4 月中下旬 Middle and the last ten-day of April	10 月上旬 First ten-day of October	[18]

ChinaXiv合作期刊
chinaXiv:201711.00309v1

产品为 16 d 合成的 250 m 空间分辨率的植被指数。为保证与气象数据的时间分辨率保持一致，采用最大值合成法(MVC)将数据进行两两合成[18–20]，生成研究区逐月的 NDVI 数据(图 2)。

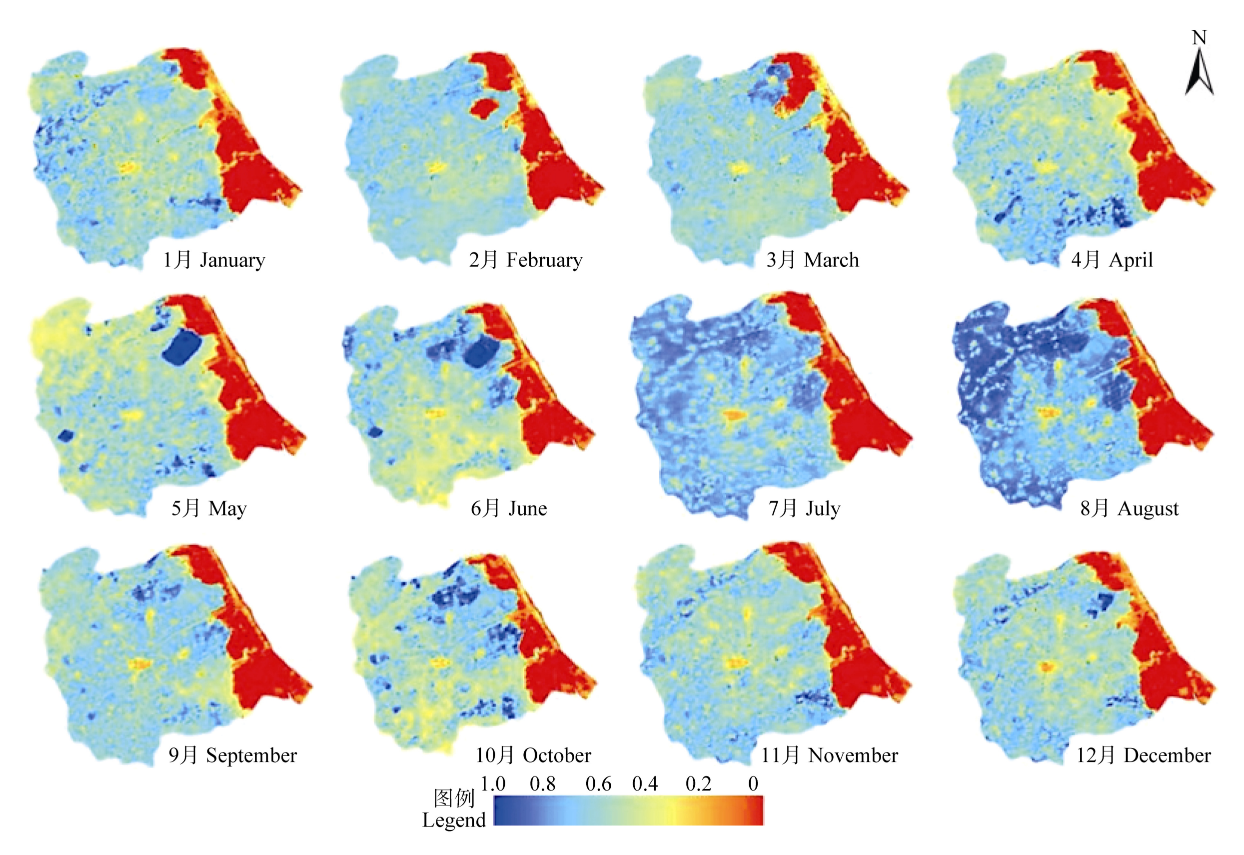


图 2　黄骅市 2011 年各月 NDVI 空间分布图(30 m×30 m)

Fig. 2　Spatial distribution of monthly NDVI in the study area of Huanghua City in 2011 (30 m × 30 m)

1.2.2　调查及化验数据处理

2014 年 7—8 月，对黄骅市进行了实地外业调查，共调查样点 310 个(图 3)，获取土样 300 份。通过土壤农化常规化验方法，对土样的土壤容重进行化验，对化验所得的土样的土壤容重取平均值得出黄骅市土壤容重平均数据；对收集的土样按照土地利用类型进行分类，通过土壤农化常规方法，对样点土样化验，得出各生态系统类型样点的全氮、全磷、全钾含量数据，对各生态系统类型样点的全氮、全磷、全钾含量数据分别取平均值，得出黄骅市各生态系统类型全氮、全磷、全钾含量数据(表 2)。

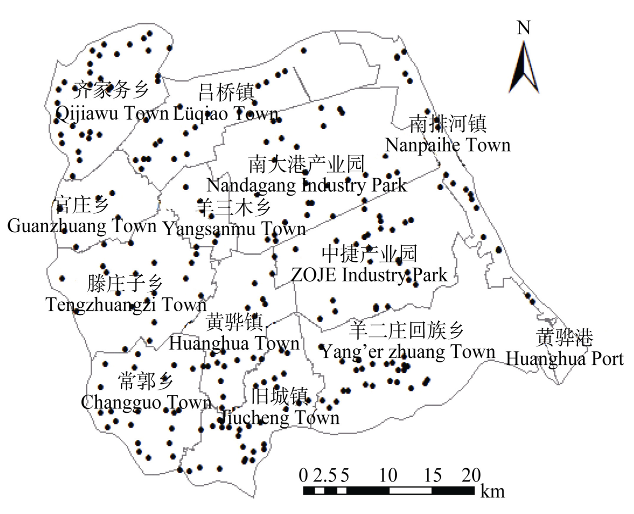


图 3　研究区内野外实地调查样点分布图

Fig. 3　Distribution of sampling points of field investigation in the study area of Huanghua City

将黄骅市行政区划图与河北省土壤图进行空间叠加，得出黄骅市土壤类型分布图(图4)，结合《河

表 2　黄骅市不同土地覆被类型土壤营养元素含量

Table 2　Contents of soil nutrient elements of different land cover types in the study area of Huanghua City　g·kg^{-1}

土地覆被类型 Land cover type	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium
草地 Grassland	0.73	0.72	29.7
园地 Garden plot	0.70	0.66	28.1
城市用地 Urban land	0.44	0.53	15.3
盐田 Salt field	0.53	0.49	19.1
农田 Farmland	0.67	0.26	26.2
盐碱地 Saline land	0.32	0.38	13.1
水域 Water area	0.25	0.34	11.5
其他土地 Other land	0.48	0.38	18.5
湿地 Wetland	0.56	0.69	19.9

ChinaXiv合作期刊

表 3 黄骅市土壤类型特征数据
Table 3 Parameters values of soil characteristics in the study area of Huanghua City

土壤类型 Soil type	面积 Area (hm^2)	颗粒组织 Particle composition (%)			有机质含量 Organic matter content ($g\cdot kg^{-1}$)	有机碳含量 Organic carbon content ($g\cdot kg^{-1}$)
		沙粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay		
氯化物盐化潮土 Chloride salinized soil	626.36	45.40	44.92	9.68	7.61	4.39
壤性滨海潮滩盐土 Loamy soil in coastal tidal flat	5 289.85	42.75	36.29	20.96	13.58	7.90
壤质潮土 Medium loam soil	1 024.31	54.90	38.10	7.00	8.10	4.72
壤质盐化沼泽土 Salinized loamy swamp soil	3 832.67	54.99	35.70	9.31	5.23	3.04
砂壤质潮土 Sandy loam soil	5 718.90	71.08	22.54	6.38	11.74	6.78
盐场 Saltern	12 111.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
黏壤质滨海盐土 Coastal saline clay soil	189.99	9.52	41.66	48.82	13.06	7.57
黏性潮土 Clay moisture soil	7 785.36	7.55	27.52	64.93	12.03	7.02
黏性湿潮土 Clay humid fluvaquents	7 611.04	34.90	39.04	26.06	17.49	10.17
黏质盐化沼泽土 Clay loamy swamp soil	5 564.64	18.25	46.01	35.74	16.02	9.31

chinaXiv:201711.00309v1

北土壤》(第 2 版)及中国土壤数据库(http://www.soil.csdb.cn/)中相应数据，得出黄骅市不同土壤类型的土壤类型特征数据(表 4)。

1.2.3 降水量数据

由中国气象数据资源共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn/)中国地面气象资料日值数据集获得黄骅、泊头、沧州市 3 个站点的降水量数据，并从黄骅市周边 20 个县气象局收集获取各县 2011 年全年的日降水量数据，时间段为 2011 年 1—12 月。

1.2.4 其他数据

黄骅市 DEM 数据由地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)下载获得，为 GDEM 30 m 分辨率数字高程数据产品。

2 研究方法

2.1 黄骅市生态系统分类

参考已有研究[21−22]，结合全国土地利用现状分类、中国科学院资源环境分类系统、滨海陆地土地覆被特征和黄骅市的实际情况，以土地利用方式为基础，将土地覆被类型划分为耕地、园地、草地、建设用地、水域、盐碱地、湿地、盐田、其他土地 9 类。根据黄骅市实际地类情况，耕地包括水浇地和旱地；园林包括园地和林地，具体为果园、其他园地、有林地和其他林地；草地包括天然牧草地和其他草地；建设用地包括城镇村及工矿用地和交通运输用地；水域包括河流水面、水库水面、坑塘水面、沟渠和水工建筑用地；盐碱地不再细分；湿地主要包括沿海滩涂、内陆滩涂和沼泽地；盐田不再细分；其他土地包括设施农用地及其他用地类型。根据滨海陆地主要生态系统的具体情况，把土地覆被类型的耕地、园地、湿地、建设用地、盐碱地、盐田、草地、水域和其他土地对应一种其最接近的生态系统，建立滨海陆地生态系统净化环境生态价值评估的专门分类体系。表 4 即是最终建立的滨海陆地生态系统净化环境生态价值评估的分类体系，基本涵盖了滨海陆地地区的主要土地覆被类型。通过野外调查发现具有一定的实用性和普适性。根据解译的 30 m×30 m 土地利用类型图得出各生态系统类型分布图。

表 4 黄骅市典型生态系统分类表
Table 4 Ecosystem classification in the study area of Huanghua City

生态系统类型 Ecosystem type	城市 Urban	农田 Farmland	园地 Garden plot	草地 Grassland	盐田 Salt field	湿地 Wetland	盐碱地 Saline land	水域 Water area	其他 Others
土地利用类型 Land use type	建设用地 Construction land	耕地 Cultivated land	园地 Garden plot	草地 Grassland	盐田 Salt field	湿地 Wetland	盐碱地 Saline land	水域 Water area	其他土地 Other land

2.2 土壤侵蚀与保持量年内动态估算模型

本文选用通用的土壤流失方程(USLE)，通过遥感技术、空间分析技术和实地调查获取各参数因子来评价研究区年内各月的土壤侵蚀量。

土壤流失方程公式如下:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \tag{1}$$

式中: A 为各月土壤侵蚀量，单位为 $t\cdot hm^{-2}\cdot month^{-1}$；$R$ 为各月的降雨侵蚀力因子，单位为 $MJ\cdot mm\cdot hm^{-2}\cdot h^{-1}$；

ChinaXiv合作期刊

K 为土壤可蚀性因子，单位为 t·h·MJ^{-1}·mm^{-1}；L 为坡长因子；S 为坡度因子；C 为各月地表植被覆盖因子；P 为土壤保持措施因子。

土壤保持量等于潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量之差，即：

$$A_c = \sum\left(A_p - A\right) \quad (2)$$

$$A_p = R \times K \times L \times S \quad (3)$$

式中：A_c 为土壤保持量，单位为 t·hm^{-2}·month^{-1}；A_p 为潜在土壤侵蚀量，潜在土壤侵蚀量为无植被覆盖情况下的土壤侵蚀情况，即没有植物叶片对降水的截留，没有植物根系对土壤的保持与固定，因此 A_p 计算公式是不考虑公式(1)中的地表植被覆盖因子和土壤保持措施因子；A 是实际土壤侵蚀量。

各侵蚀因子计算公式如下：

1)降雨侵蚀力因子(R)

$$R = \lambda \sum_{j=1}^{k}\left(D_j\right)^{\beta} \quad (4)$$

$$\beta = 0.836\,3 + \frac{18.144}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \quad (5)$$

$$\lambda = 21.586\beta^{-7.189\,1} \quad (6)$$

本文采用章文波等[23]基于日降雨量资料的半月降雨侵蚀力模型。式中 R_i 为第 i 月的侵蚀力(MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1})，D_j 为该月内第 j 天的≥12 mm 侵蚀性降雨标准的日雨量(mm)，k 为该月时段内的时间，P_{d12} 为该月内日降雨量≥12 mm 的日平均降雨量(mm)，P_{y12} 为日降雨量≥12 mm 的年平均降雨量(mm)。

2)土壤可蚀性因子(K)

$$K = \left\{0.2 + 0.3\exp\left[-0.025\,6 s_d\left(1 - \frac{s_i}{100}\right)\right]\right\} \times \left(\frac{s_i}{s_e + s_i}\right)^{0.3} \times \left[1.0 - \frac{0.25 s_c}{s_c + \exp\left(3.72 - 2.95 s_c\right)}\right] \times \left\{1.0 - \frac{0.7\left(\frac{1 - s_d}{100}\right)}{1 - \frac{s_d}{100} + \exp\left[-5.51 + 22.9\left(1 - \frac{s_d}{100}\right)\right]}\right\} \quad (7)$$

式中：S_d 为土壤中沙粒含量；S_i 为土壤中粉粒含量，S_e 为土壤中黏粒含量，S_c 为土壤中有机碳含量，以上单位均为%。

本文采用 Williams 等[24]的侵蚀生产力评价模型 EPIC，其土壤可蚀性因子仅与土壤砂粒、粉粒、黏粒含量和土壤有机质有关。式中 K 为土壤可蚀性因子，S_d 为土壤中沙粒含量(%)，S_i 为土壤中粉粒含量(%)，S_e 为土壤中黏粒含量(%)，S_c 为土壤中有机碳含量(%)。

3)坡长因子(L)

$$L = \left(\frac{l}{22.13}\right)^{m} \quad (8)$$

坡长因子的算法建立在 McCool 等[25]研究基础之上。式中：L 为坡长因子；l 为坡长；m 为坡长系数，m 的取值可通过像元坡度百分比 θ 进行划分(当 θ≥9%时，m=0.5；当 3%≤θ<9%时，m=0.4；当 1%≤θ<3%时，m=0.3；当 θ<1%时，m=0.2)。

4)坡度因子(S)

$$S = \begin{cases} \text{slope} \times 10.8 + 0.03 & (\text{slope} \leqslant 5^\circ) \\ \text{slope} \times 16.8 - 0.05 & (5^\circ < \text{slope} < 14^\circ) \\ \text{slope} \times 21.91 - 0.96 & (\text{slope} \geqslant 14^\circ) \end{cases} \quad (9)$$

式中：S 为坡度因子，slope 表示坡度，从 DEM 图中提取。

5)地表植被覆盖因子(C)

$$C = \begin{cases} 1 & (\sigma = 0) \\ 0.650\,8 - 0.346\,4\lg\sigma_v & (0 < \sigma_v < 78.3\%) \\ 0 & (\sigma_v \geqslant 78.3\%) \end{cases} \quad (10)$$

式中：C 为各月地表植被覆盖因子；σ_v 表示像元第 v 月的植被覆盖度，从 DEM 图像中提取。

6)土壤保持措施因子(P)

土壤保持措施因子(P)为采取保持措施后土壤流失量与顺坡种植时土壤流失量比值[26]。P 为土壤保持措施因子，园地取值为耕地与林地的均值，林地 P 值为 1，盐碱地取值为草地和荒漠的均值，荒漠的 P 值为 0.33，其他土地主要为设施农用地，取值参照建设用地。

土壤保持措施因子取值在 0 与 1 之间，0 表示没有任何水土保持措施时的土壤侵蚀量，1 表示采取良好的水土保持措施之后的土壤侵蚀量。该值因生态系统类型不同而存在差异，具体数值[30]见下表 5。

表 5　黄骅不同生态系统类型的土壤保持措施因子(*P*)值

Table 5　Factor values of soil conservation measure (P) of different ecosystems in the study area of Huanghua

生态系统类型 Ecosystem type	*P* 值 *P* value	生态系统类型 Ecosystem type	*P* 值 *P* value	生态系统类型 Ecosystem type	*P* 值 *P* value
耕地 Cultivated land	0.47	建设用地 Construction land	0	湿地 Wetland	0
园地 Garden plot	0.74	水域 Water area	0	盐田 Salt field	0
草地 Grassland	0.80	盐碱地 Saline land	0.57	其他土地 Other land	0

chinaXiv:201711.00309v1

ChinaXiv合作期刊
chinaXiv:201711.00309v1

2.3 土壤保持价值年内动态评估模型

土壤保持价值包括减少废弃土地价值、减少土壤养肥流失价值、减少淤泥淤积价值之和[27]。基于美国通用的水土流失方程(USLE)进行土壤形成与保持物质量的计算，利用机会成本法、市场价值法、影子价格法和替代工程法对该价值进行估算。具体公式为:

$$V_{ac}=V_{ef}+V_{en}+V_{es} \quad (11)$$

式中：V_{ac}表示土壤保持价值，V_{ef}为减少土壤养肥流失价值；V_{en}为减少淤泥淤积价值；V_{es}为减少废弃土地价值。以上各价值均以土壤保持量为基础进行计算。

根据A_c，分别计算V_{ef}、V_{en}和V_{es}的值。

2.3.1 减少土壤养肥流失价值(V_{ef})

减少土壤养肥流失价值包括两部分，一部分为保持N、P、K的价值，可通过施用化肥来折算；一部分为有机质保持价值，可用薪柴费用来替代核算。具体公式如下：

$$V_{ef}=A_c\times C_i\times P_i\div 10^4+C_o \quad (12)$$

式中：V_{ef}为减少土壤养肥流失价值，单位为元·hm^{-2}·month^{-1}; C_i为土壤中N、P、K的含量，通过试验数据获得(表2); P_i为N、P、K的单位价值(N、P、K价格采用化肥市场2011年底价格，将N、P、K肥折纯之后价格为2 549 元·t^{-1})。

$$C_o=D_{soil}\times T_{soil}\times 10^6\times S_o \quad (13)$$

式中：C_o表示有机质保持价值; D_{soil}为土壤容重，由试验数据求得，本文取值1.17 t·m^{-3}; T_{soil}为平均土层厚度，本文取值 0.5 m; S_o为土壤有机质含量(%)，由试验数据获得(表3)。

2.3.2 减少淤泥淤积价值(V_{en})

减少淤泥淤积价值主要体现在减少洪涝及旱灾发生机率。生态系统土壤保持功能可减少水土流失导致的水域内淤泥增加、蓄水量减少、灾害抵御能力减弱现象。这项功能的计算可通过替代工程法，利用水库蓄水价值来计算。具体公式如下:

$$V_{en}=A_c\times 24\%\times P_w\div D_{soil}\div 10^4 \quad (14)$$

式中：V_{en}为减少淤泥淤积价值，单位为元·hm^{-2}·month^{-1}; A_c为X像元处土壤保持量，单位为t·hm^{-2}·month^{-1}；24%表示水土流失过程中24%的土壤会淤积在水域内[28]; P_w修建水库单位库容的平均成本，参照江波等[29]、郭伟[30]的研究成果，根据建筑安装工程资产投资价格指数计算，得出2011年我国水库1 m^{3}库容的成本花费为7.53元; D_{soil}为土壤容重，本文取值1.17 t·m^{-3}。

2.3.3 减少废弃土地价值(V_{es})

减少废弃土地价值可通过机会成本法计算，假设地表种植不同植被，由于植被的存在减少了表土的损失，创造了经济价值。具体公式如下:

$$V_{es}=A_c\times P_f\div D_{soil}\div T_{soil}\div 10^4 \quad (15)$$

式中: V_{es}为减少废弃土地价值，单位为元·hm^{-2}·month^{-1}; A_c为X像元处土壤保持量，单位为t·hm^{-2}·month^{-1}; P_f地表经济收益，单位为元·hm^{-2}·a^{-1}，取2011年农业、牧业、渔业的平均收益[4]。根据2012年《河北经济年鉴》, 2011年黄骅市农林牧渔业总产值为460 639万元，农用地面积1 757.61 km^2(该处所指农用地包括耕地、园地、林地、草地、盐碱地、养殖水面、设施农业用地等)，因此，黄骅市单位面积平均地表经济收益为: 2.6208 万元·hm^{-2}。D_{soil}为土壤容重，本文取值 1.17 t·m^{-3}; T_{soil}为平均土层厚度，本文取值0.5 m。

3 结果及分析

3.1 土壤侵蚀与保持量年内动态特征分析

3.1.1 土壤侵蚀量年内动态分析

黄骅市2011年全年的土壤侵蚀总量为5.59 t·hm^{-2}，全年的土壤侵蚀集中发生在4—9月，4—9月的土壤侵蚀总量占全年土壤侵蚀量的93.38%，其中8月的土壤侵蚀量最大，达到1.90 t·hm^{-2}，占全年土壤侵蚀总量的33.99%。不考虑侵蚀量为零的月份，黄骅市2011年土壤侵蚀量最小的月份为11月，土壤侵蚀量为0.42 t·hm^{-2}，占全年土壤侵蚀量的6.62%(图4)。

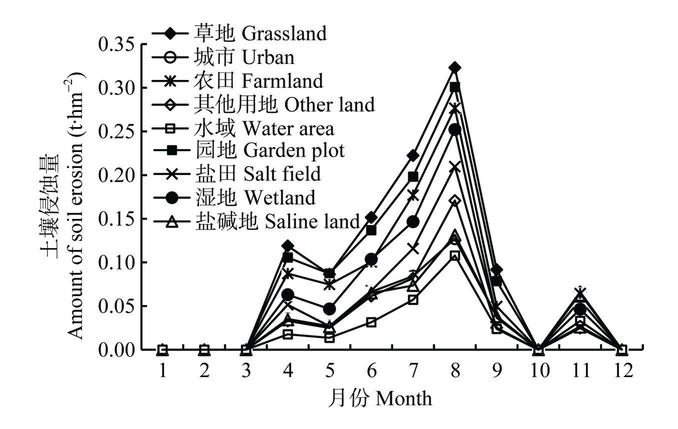


图4 2011年黄骅市各生态系统类型土壤侵蚀量年内动态变化

Fig. 4 Dynamic variations of soil erosion amounts of different ecosystems in the study area of Huanghua City in 2011

黄骅市各生态系统类型单位面积土壤侵蚀量大小排序为草地>园地>农田>盐碱地，单位面积年土壤侵蚀量分别为1.06 t·hm^{-2}·a^{-1}、0.96 t·hm^{-2}·a^{-1}、0.83 t·hm^{-2}·a^{-1}、0.28 t·hm^{-2}·a^{-1}。参照水利部颁布的强制性标准《土

ChinaXiv合作期刊

壤侵蚀分类分级标准》规定，黄骅市各生态系统类型现实土壤侵蚀量均低于全国各侵蚀类型区最低容许土壤侵蚀量 2 t·hm^{-2}·a^{-1}，说明该地区土壤的肥力基本稳定，各生态系统发挥了重要的土壤保持功能。

3.1.2　土壤保持量年内动态分析

黄骅市 2011 年全年的土壤保持总量为 1 944.19 t·hm^{-2}。全年中 4—9 月份的土壤保持总量占全年土壤保持量的 93.40%，其中 8 月的土壤保持量最大，达 558.31 t·hm^{-2}，占全年土壤保持总量的 28.72%；土壤保持量最小的月份为 11 月，为 128.36 t·hm^{-2}，占全年土壤保持量的 6.60%。

黄骅市各生态系统类型土壤保持功能呈现出相似的动态变化规律(图 5)，5—8 月呈现增加趋势，其动态曲线高峰值出现在 8 月，与土壤侵蚀的季节动态变化规律一致。从各生态系统类型年内动态变化规律可以看出，草地在 8 月份的土壤保持量达到最大，为 87.77 t·hm^{-2}，占草地全年土壤保持量的 25.65%，不考虑土壤保持量为零的月份，水域在 11 月份的土壤保持量最小，为 7.51 t·hm^{-2}，占水域全年土壤保持量的 6.94%。

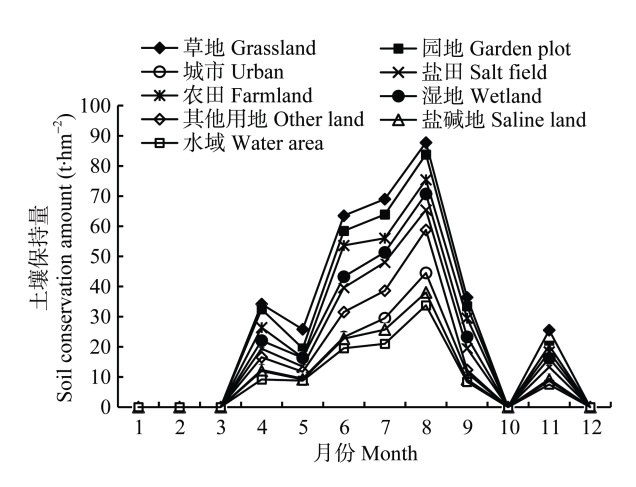


图 5　2011 年黄骅市各生态系统类型土壤保持量年内动态变化

Fig. 5　Dynamic variations of soil conservation amounts of different ecosystems in the study area of Huanghua City in 2011

3.2　土壤保持价值年内动态特征分析

3.2.1　全年土壤保持价值分析

从表 6 可知，黄骅市 2011 年全年的土壤保持价值为 7.305×10^{7} 元，各土壤保持价值构成中，减少土壤养肥流失价值贡献最大，为 6.434×10^{7} 元，约占全部土壤保持价值的 88.07%，减少废弃土地价值贡献最小，为 0.61×10^{6} 元，约占全部土壤保持价值的 0.84%；从各生态系统类型看，贡献最大的为农田，全年贡献总价值为 3.227×10^{7} 元，占全部土壤保持价值的 43.9%，贡献最小的为园地，这是由于园地面积仅占黄骅市总面积的 2.95%，园地全年贡献总价值仅为 2.85×10^{6} 元，占全部土壤保持价值的 3.9%。

表 6　2011 年黄骅市各生态系统类型全年土壤保持价值构成

Table 6　Composition of annual soil conservation values of different ecosystems in the study area of Huanghua City in 2011

生态系统类型 Ecosystem types	面积 Area (10^{2}hm^2)	减少土壤养肥流失价值 Value of reducing soil fertility loss			减少淤泥淤积价值 Value of reducing silt deposition			减少废弃土地价值 Value of reducing abandoned land			土壤保持价值 Value of soil conservation (Yuan·hm^{-2})	土壤保持总价值 Total value of soil conservation (10^6 Yuan)
		价值 Value (Yuan·hm^{-2})	总价值 Total value (10^6 Yuan)	百分比[1] Percent (%)	价值 Value (Yuan·hm^{-2})	总价值 Total value (10^6 Yuan)	百分比 Percent (%)	价值 Value (Yuan·hm^{-2})	总价值 Total value (10^6 Yuan)	百分比 Percent (%)		
草地 Grassland	63.95	427.14	2.73	86.25	64.04	0.41	12.93	4.06	0.03	0.82	495.24	3.17
园地 Garden plot	64.26	383.63	2.47	86.45	56.34	0.36	12.70	3.81	0.02	0.86	443.79	2.85
城市 Urban	420.23	235.00	9.88	89.10	26.51	1.11	10.05	2.24	0.09	0.85	263.76	11.08
盐田 Salt field	157.02	301.51	4.73	88.06	37.88	0.59	11.07	2.98	0.05	0.87	342.37	5.38
农田 Farmland	774.00	364.00	28.17	87.31	49.53	3.83	11.88	3.40	0.26	0.82	416.92	32.27
湿地 Wetland	92.14	341.17	3.14	88.15	42.66	0.39	11.02	3.20	0.03	0.83	387.03	3.57
其他土地 Other land	123.65	268.26	3.32	88.15	33.50	0.41	11.01	2.57	0.03	0.84	304.32	3.76
盐碱地 Saline land	341.93	211.31	7.23	89.70	22.21	0.76	9.43	2.04	0.07	0.87	235.56	8.05
水域 Water area	140.66	190.00	2.67	91.46	15.86	0.22	7.64	1.89	0.03	0.91	207.75	2.92
总计 Total	2 177.84	—	64.34	88.07	—	8.10	11.09	—	0.61	0.84	—	73.05

1)百分比为各生态系统土壤保持单项功能价值占该生态系统土壤保持总价值的比例。1) The percent is the ratio of single function value of soil conservation of one ecosystem to the total soil conservation value of the ecosystem.

黄骅市各生态系统类型单位面积年土壤保持价

chinaXiv:201711.00309v1

ChinaXiv合作期刊
chinaXiv:201711.00309v1

值大小排序为草地>园地>农田>湿地>盐田>其他用地>城市>盐碱地>水域，其中，草地单位面积年土壤保持价值最大，为 495.24 元·hm^{-2}，水域最小，为 207.75 元·hm^{-2}；对各生态系统类型单位面积年土壤保持价值构成进行比较发现，最大的是草地的减少土壤养肥流失价值，为 427.14 元·hm^{-2}，最小的是水域的减少废弃土地价值，为 1.89 元·hm^{-2}。

3.2.2 各生态系统类型土壤保持价值年内动态特征分析

从图 6a 可以看出，各生态系统类型土壤保持价值中减少土壤养分流失价值所占比例最大，8 月份的单位面积减少土壤养分流失价值最大。其中 8 月份草地减少土壤养分流失价值最高，为 110.17 元·hm^{-2}；9 月水域最低，为 10.97 元·hm^{-2}。黄骅市各生态系统类型年内单位面积减少土壤养分流失价值大小排序基本为草地>园地>农田>湿地>盐田>其他用地>城市>盐碱地>水域。

从图 6b 可以看出，年内单位面积减少淤泥淤积价值大小排序与减少土壤养分流失价值相同，单位面积减少淤泥淤积价值峰值出现在 8 月的草地，为 17.08 元·hm^{-2}，最小值出现在 5 月的水域，为 0.12 元·hm^{-2}。

从图 6c 可以看出，年内减少废弃土地价值在土壤保持价值中比重最小，只占 0.84 左右，其中单位面积减少废弃土地价值峰值出现在 8 月的草地，为 1.62 元·hm^{-2}，最小值出现在 5 月的水域，为 0.02 元·hm^{-2}，变化趋势与单位价值大小排序与其他价值基本一致。

从图 6d 可以看出，各生态系统类型土壤保持价值年内动态变化中，不考虑价值为 0 的几个月，8 月前湿地的土壤保持价值变化范围最大，变化区间从 4 月的 33.89 元·hm^{-2} 至 8 月的 105.77 元·hm^{-2}；其他土地的变化范围最小，变化区间 4 月的 16.94 元·hm^{-2} 至 8 月的 76.86 元·hm^{-2}。各生态系统类型全年变化规律基本相似。

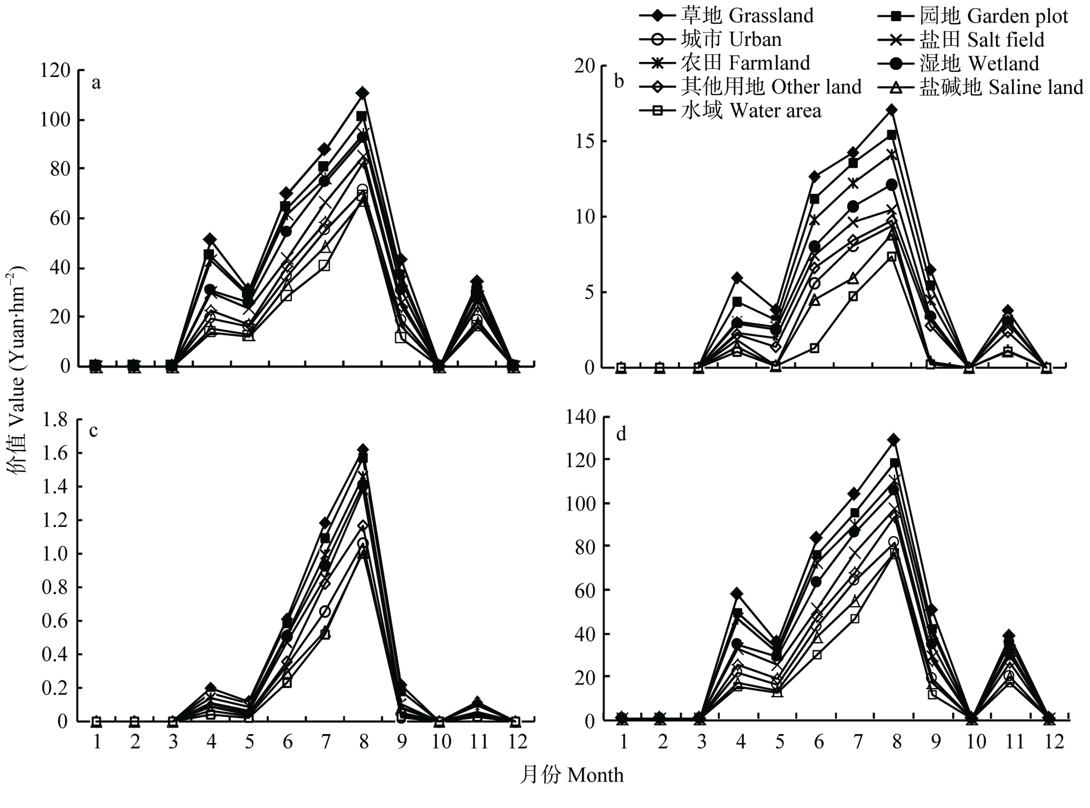


图 6 2011 年黄骅市各生态系统类型减少土壤养肥流失价值(a)、减少淤泥淤积价值(b)、减少废弃土地价值(c)和土壤保持总价值(d)的年内动态变化

Fig. 6 Monthly dynamic changes of value of reducing soil fertility loss (a), value of reducing silt deposition (b), value of reducing abandoned land (c) and total value of soil conservation (d) of different ecosystems in the study area of Huanghua City in 2011

3.2.3 土壤保持价值构成年内动态特征分析

图 7 表明，单位面积土壤保持价值构成中，贡献度排序为减少土壤养肥流失价值>减少淤泥淤积价值>减少废弃土地价值。其中，贡献度最大的减少土壤养肥流失价值，年内贡献价值为 2 722.01 元·hm^{-2}·a^{-1}，贡献最小的减少废弃土地价值，年内贡献价值为

ChinaXiv合作期刊

26.20 元·hm^{-2}·a^{-1}。

各单位面积减少土壤养肥流失价值、减少淤泥淤积价值、减少废弃土地价值呈现出一致的变化规律，1—3 月、10 月和 12 月价值都为零，5—8 月呈现增加趋势，8 月达到峰值，与土壤保持量的季节动态变化规律一致。全年土壤保持价值主要集中于 5—9 月，创造的土壤保持价值约占全年土壤保持总价值的 82.47%。

通过比较其累积价值，得出减少土壤养肥流失价值、减少淤泥淤积价值、减少废弃土地价值、土壤保持价值在 4—8 月增加较快，并且增加率逐月增大，而 9 月份以后增加趋势明显变缓，累积价值也趋于平稳。

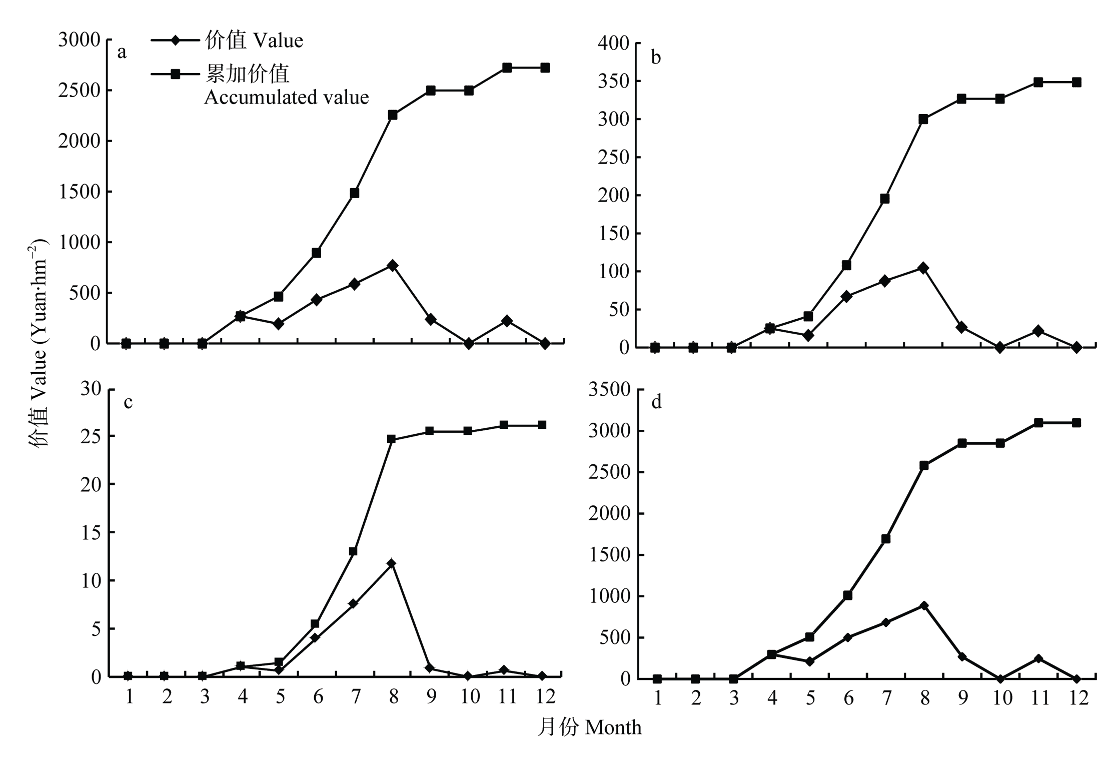


图 7　2011 年黄骅市减少土壤养肥流失价值(a)、减少淤泥淤积价值(b)、减少废弃土地价值(c)和土壤保持总价值(d)的年内动态变化

Fig. 7　Monthly dynamic changes of value of reducing soil fertility loss (a), value of reducing silt deposition (b), value of reducing abandoned land (c) and total value of soil conservation (d) in the study area of Huanghua City in 2011

4　结论

本研究以月为时间尺度，以 30 m×30 m 栅格为空间单元，对滨海盐碱土区农田、草地、园地、湿地、城市、盐碱地、盐田、水域等典型生态系统类型土壤保持价值年内动态变化规律进行了定量分析和探讨。研究发现，受生态系统植被覆盖和气候条件的影响，年内各月土壤保持价值分配不均，其年内呈现出双峰型动态变化规律；不同生态系统类型对土地的利用方式不同，导致同一地区不同生态系统类型土壤保持价值各有差别。各生态系统类型中 8 月份草地的土壤保持价值最高，为 110.17 元·hm^{-2}，9 月水域的土壤保持价值最低，为 10.97 元·hm^{-2}。年内各月土壤保持价值及各月价值累积构成中，减少土壤养分流失价值的贡献率均最高，减少废弃土地价值的贡献率均最低；土壤保持价值年内动态变化中，1—3 月、10 月和 12 月价值都为零，5—8 月呈现增加趋势，8 月达到峰值，与土壤保持量的季节动态变化规律一致，全年土壤保持价值主要集中于 5—9 月，创造的土壤保持价值约占全年土壤保持总价值的 82.47%。

生态系统是一个动态系统，因此其提供的生态系统服务功能也具有动态性，进行动态研究有助于揭示生态系统服务形成机制及探讨可能的调控机制。通过研究发现，生态系统土壤保持价值具有明显的季节变化规律，在雨季受暴雨等侵蚀性降雨的影响，土壤潜在侵蚀量变大，生态系统的土壤保持功能和价值得以发挥。区域的各种人为生产及建设活动应考虑到对土壤侵蚀的影响，在高潜在侵蚀量变大之前做好水土保持工作，减少对植被等土壤保持因子的破坏。本文仅对降雨造成的土壤侵蚀进行了研究，由于研究条件限制，未对海浪和潮汐侵蚀方面的土壤保持价值进行估算，在今后的研究中应予以完善；本文研究了县域尺度滨海盐碱土区土壤

chinaXiv:201711.00309v1

ChinaXiv合作期刊

保持价值年内动态特征，但选用的 MODIS 数据及 GDEM 数据空间分辨率有限，土壤侵蚀结果势必会产生一些误差，在今后的研究中可加强运用高分辨率遥感数据对土壤侵蚀量及土壤保持价值估算方面的探索。

参考文献 References

[1] 李士美，谢高地，张彩霞，等．森林生态系统服务流量过程研究——以江西省千烟洲人工林为例[J]．资源科学，2010, 32(5): 831–837
Li S M, Xie G D, Zhang C X, et al. Flow processes of forest ecosystem services: A case study on Qianyanzhou plantation, Jiangxi Province[J]. Resources Science, 2010, 32(5): 831–837

[2] 李士美，谢高地，张彩霞，等．森林生态水源涵养服务流量过程研究[J]．自然资源学报, 2010, 25(4): 585–593
Li S M, Xie G D, Zhang C X, et al. Flow process of water conservation service of forest ecosystem[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(4): 585–593

[3] Chan K M, Shaw M R, Cameron D R, et al. Conservation planning for ecosystem services[J]. PLoS Biology, 2006, 4(11): 2138–2152

[4] 刘琦，明博．GIS 支持下生态系统土壤保持生态价值评估——以太原市城区及近郊区为例[J]．土壤通报，2011, 42(2): 456–460
Liu Q, Ming B. The ecological value evaluation of soil conservation of ecosystem by GIS — A case study of urban and suburban area of Taiyuan[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(2): 456–460

[5] 李亦秋，冯仲科，韩烈保．丹江口库区及上游生态系统土壤保持效益价值评估[J]．中国人口·资源与环境，2010, 20(5): 64–69
Li Y Q, Feng Z K, Han L B. Evaluation of soil conservation benefit in Danjiangkou Reservoir area and the upper reaches[J]. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(5): 64–69

[6] 卞鸿雁，庞奖励，任志远，等．基于土地利用变化的土壤保持效益时空动态——以黄土高原南部为例[J]．生态学杂志，2012, 31(9): 2391–2396
Bian H Y, Pang J L, Ren Z Y, et al. Effects of land use change on soil conservation value in southern Loess Plateau of Northwest China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(9): 2391–2396

[7] 韩永伟，高吉喜，王宝良，等．黄土高原生态功能区土壤保持功能及其价值[J]．农业工程学报, 2012, 28(17): 78–85
Han Y W, Gao J X, Wang B L, et al. Evaluation of soil conservation function and its value in major eco-function areas of Loess Plateau in eastern Gansu Province[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(17): 78–85

[8] 孙文义，邵全琴，刘纪远．黄土高原不同生态系统水土保持服务功能评价[J]．自然资源学报, 2014, 29(3): 365–376
Sun W Y, Shao Q Q, Liu J Y. Assessments of soil conservation function of the ecosystem services on the Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(3): 365–376

[9] 李士美，谢高地，张彩霞，等．森林生态系统土壤保持价值的年内变化[J]．生态学报, 2010, 30(13): 3482–3490
Li S M, Xie G D, Zhang C X, et al. Intra-annual dynamics of soil conservation value in forest ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(13): 3482–3490

[10] 裴厦，谢高地，李士美，等．典型草地的土壤保持价值流量过程比较[J]．生态学报, 2012, 32(13): 4025–4033
Pei X, Xie G D, Li S M, et al. Soil convervation value flow processes of two typical grasslands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(13): 4025–4033

[11] 张世绥．盐碱地绿化的优良树种——白刺[J]．林业实用技术, 2006(3): 27
Zhang S S. Fine tree species for forestation in saline alkali soil — *Nitraria schoberi* L.[J]. Forestry Practical Technology, 2006(3): 27

[12] 刘芳．冬枣优质丰产管理新技术[J]．现代农村科技，2009(3): 30–30
Liu F. Management technology of high-yield and high-quality winter jujube cultivation[J]. Modern Rural Science and Technology, 2009(3): 30–30

[13] 高祺，缪启龙．河北省木本植物物候对气候变化的响应及地区差异性分析[C]．第 27 届中国气象学会年会应对气候变化分会场——人类发展的永恒主题论文集, 2010
Gao Q, Miao Q L. Response of woody plant phenology to climate change and regional differences in Hebei Province[C]. Proceedings of The Twenty-seventh Annual Meeting of China Meteorological Society of China in Response to Climate Change, 2010

[14] 祁如英，赵隆香，朱保文，等．青海诺木洪地区芦苇物候现象变化规律分析[J]．青海气象, 2011(2): 65–68
Qi R Y, Zhao L X, Zhu B W, et al. Analysis of the change regularity of *Phragmites australis* phenology in Qinghai Nuomuhong[J]. Journal Qinghai Meteorology, 2011 (2): 65–68

[15] 李正国，杨鹏，周清波，等．基于时序植被指数的华北地区作物物候期/种植制度的时空格局特征[J]．生态学报，2009, 29 (11): 6216–6226
Li Z G, Yang P, Zhou Q B, et al. Research on spatiotemporal pattern of crop phonological characteristics and cropping system in North China based on NDVI time series data[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 6216–6226

[16] 史纪安，刘玉华，韩清芳，等．紫花苜蓿物候期与热量条件的关系[J]．西北农林科技大学学报：自然科学版，2009, 37(6): 39–46
Shi J A, Liu Y H, Han Q F, et al. Relationship between phonological phase and thermal conditions for alfalfa[J]. Journal of Northwest Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition, 2009, 37(6): 39–46

[17] 高祺，陈静，阎访，等．河北省草本植物物候特征及其对气候变暖的响应[J]．生态学杂志, 2012, 31(3): 600–605
Gao Q, Chen J, Yan F, et al. Phenological characteristics of herbaceous plants in Hebei Province and their responses to climate warming[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(3): 600–605

[18] Town S J, Ju S C, Li W, et al. Global land cover classification by remote sensing: Present capabilities and future possibilities[J].

chinaXiv:201711.00309v1

ChinaXiv合作期刊

Remote Sensing of Environment, 1991, 35(2/3): 234–255
[19] Loveland T, Merchant J, Ohlen D, et al. Development of a land cover characteristics database for the conterminous US[J]. Photo-grammetric Engineering and Remote Sensing, 1991, 57(11): 143–146
[20] Ehrlich D, Estes J, Singh A. Applications of NOAA-AVHRR 1km data for environmental monitoring[J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(1): 145–161
[21] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189–196
Xie G D, Lu C X, Leng Y F, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2): 189–196
[22] 张振明, 刘俊国. 生态系统服务价值研究进展[J]. 环境科学学报, 2011, 31(9): 1835–1842
Zhang Z M, Liu J G. Progress in the valuation of ecosystem services[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(9): 1835–1842
[23] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22 (6): 705–711
Zhang W B, Xie Y, Liu B Y. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall aumounts[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(6): 705–711
[24] Williams J R, Jones C A, Dyke P T. Modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1984, 27(1): 129–144
[25] McCool D K, Foster G R, Mutchler C K, et al. Revised slope length factor for the universal soil loss equation[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1989, 32(5): 1571–1576
[26] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[M]. Agriculture Handbook. Washington D C, 1997
[27] 孙新章, 谢高地, 成升魁, 等. 中国农田生产系统土壤保持功能及其经济价值[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 156–159
Sun X Z, Xie G D, Cheng S K, et al. Services for soil conservation and its monetary value in Chinese cropping systme[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(4): 156–159
[28] 肖玉, 谢高地, 安凯. 青藏高原生态系统土壤保持功能及其价值[J]. 生态学报, 2003, 23(11): 2367–2378
Xiao Y, Xie G D, An K. The function and economic value of soil conservation function of ecosystems in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(11): 2367–2378
[29] 江波, 欧阳志云, 苗鸿, 等. 海河流域湿地生态系统服务功能价值评价[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2236–2244
Jiang B, Ouyang Z Y, Miao H, et al. Ecosystem services valuation of the Haihe River basin wetlands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(8): 2236–2244
[30] 郭伟. 北京地区生态系统服务价值遥感估算与景观格局优化预测[D]. 北京: 北京林业大学, 2012
Guo W. Remote sensing estimation of ecosystem service value and optimization of landscape pattern in Beijing[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012

chinaXiv:201711.00309v1